

УДК 621.317

О.Ю. ГЛЕБОВ**К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПО ЕГО КОНСТРУКТИВНЫМ ПАРАМЕТРАМ**

Целью является разработка формул для определения сопротивления заземляющего устройства подстанций с открытыми распределительными устройствами 330(220) кВ, которые учитывают следующие параметры: площадь заземляющего устройства; размер ячейки сетки заземляющего устройства; периметр поперечного сечения горизонтальных заземлителей; эквивалентное удельное сопротивление грунта; ток короткого замыкания на шинах распределительного устройства. Для проведения исследований использовались теория планирования экспериментов, теория электрических цепей, математическое моделирование в пакете Grounding 1.0 и Microsoft Excel. В результате проведения многофакторных экспериментов получены зависимости сопротивления заземляющего устройства от указанных параметров. Полученные формулы позволяют определять конструктивные параметры заземляющих устройств подстанций 330(220) кВ, исходя из требований к сопротивлению заземляющего устройства.

Ключевые слова: заземляющее устройство, подстанции, сопротивление заземляющего устройства, многофакторный эксперимент.

О.Ю. ГЛЕБОВ**ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЗА ЙОГО КОНСТРУКТИВНИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Метою є розробка формул для визначення опору заземлювального пристрою підстанцій з відкритими розподільними пристроями 330(220) кВ, які враховують наступні параметри: площа заземлювального пристрою; розмір чарунки сітки заземлювального пристрою; периметр поперечного перерізу горизонтальних заземлювачів; еквівалентний питомий опір ґрунту; струм короткого замикання на шинах розподільного пристрою. Для проведення досліджень використовувалися теорія планування експериментів, теорія електричних кіл, математичне моделювання в пакеті Grounding 1.0 і Microsoft Excel. В результаті проведення багатофакторних експериментів отримані залежності опору заземлювального пристрою від зазначених параметрів. Отримані формули дозволяють визначати конструктивні параметри заземлюючих пристроїв підстанцій 330(220) кВ, виходячи з вимог до опору заземлювального пристрою.

Ключові слова: заземлюючий пристрій, підстанції, опір заземлюючого пристрою, багатофакторний експеримент.

О.Ю. ГЛЕБОВ**TO THE QUESTION OF DETERMINING THE GROUNDING SYSTEM RESISTANCE ACCORDING TO ITS DESIGN PARAMETERS**

The purpose is to develop formulas for determining the grounding system resistance of substations with open distribution devices 330(220) kV, which take into account the following parameters: the area of the grounding system; grid mesh size of the grounding system; the perimeter of the horizontal grounding electrodes cross section; equivalent resistivity of the soil; short-circuit current on the bus switchgear. To carry out the research, the theory of experiment planning, the theory of electrical circuits, mathematical modeling in the package Grounding 1.0 and Microsoft Excel were used. As a result of carrying out the multifactor experiments, the dependences of the grounding system resistance on the specified parameters were obtained. The obtained formulas allow to determine the design parameters of grounding system of substations 330(220) kV, based on the requirements for the grounding system resistance.

Keywords: grounding system, substation, grounding system resistance, multifactor experiment.

Введение. В п. 1.7.59 ПУЭ:2017 [1] показано, что главной задачей ЗУ является обеспечение электробезопасности. Для решения указанной задачи разработаны основные критерии проектирования ЗУ, которые изложены в соответствующих пунктах [1]: 1) по допустимому значению сопротивления ЗУ; 2) по допустимому значению напряжения прикосновения; 3) по допустимому значению напряжения на ЗУ.

В ряде работ, например [2], рассмотрены вопросы реконструкции ЗУ по допустимому значению напряжения прикосновения. В работах [3–6] приведены формулы для расчета сопротивления ЗУ подстанций.

Целью работы является определение сопротивления ЗУ подстанций с распределительными устройствами 330(220) кВ по параметрам подстанции, в том числе и конструктивным параметрам ЗУ.

Параметры подстанции, влияющие на сопротивление ЗУ. В работе [7] рассмотрено около 40 параметров, влияющих на сопротивление равномерной квадратной сетки ЗУ. Выделено шесть независимых факторов: площадь ЗУ ($S_{ЗУ}$); размер ячейки сетки ЗУ ($b_{ЗУ}$); периметр поперечного сечения горизонтальных заземлителей ($p_{ГЗ}$); эквивалентное удельное сопротивление грунта ($\rho_{ЭКВ}$); ток КЗ на шинах ОРУ ($I_{КЗ}$); глу-

бина горизонтальных заземлителей ($t_{ГЗ}$). Показано, что сопротивление ЗУ пренебрежимо мало зависит от глубины горизонтальных заземлителей ($ГЗ$) в диапазоне значений 0,4–1,4 м. Анализ экспериментальных данных, полученных при проведении диагностики ЗУ восьмидесяти подстанций 330(220) кВ, позволил определить реальный диапазон изменения перечисленных факторов (см. табл. 1).

Таблица 1 – Диапазон изменения факторов, влияющих на сопротивление равномерной квадратной сетки ЗУ

Обозначение фактора	Значение фактора	
	минимальное	максимальное
$S_{ЗУ} \times 10^4, \text{ м}^2$	0,906352	9,251508
$b_{ЗУ}, \text{ м}$	7,03	30,4
$\rho_{ГЗ}, \text{ мм}$	31,4	172,0
$\rho_{ЭКВ}, \text{ Ом} \times \text{ м}$	1,69	249,67
$I_{КЗ}, \text{ кА}$	2,43	42,961
$t_{ГЗ}, \text{ м}$	0,5	2,0

Нормативная формула. В государственном стандарте ГОСТ 12.1.30-81 [3] приведена следующая формула для определения сопротивления ЗУ, Ом:

$$R_{ЗУ} = \frac{\rho_{ЭКВ}}{2 \cdot \sqrt{S_{ЗУ}}}, \quad (1)$$

где $S_{ЗУ}$ – площадь ЗУ, м^2 ; $\rho_{ЭКВ}$ – эквивалентное удельное сопротивление грунта, $\text{Ом} \times \text{м}$.

Формула Оллендорфа – Лорана. В работах [5], [6] рассматривается формула Оллендорфа - Лорана для определения сопротивления ЗУ, выполненного в виде квадратной равномерной сетки, расположенной в однородном грунте, по периметру которой равномерно установлены вертикальные заземлители, Ом:

$$R_{ЗУ} = A \cdot \frac{\rho_{ЭКВ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} + \frac{\rho_{ЭКВ}}{\ell_{ГЗ.Р} + \ell_{ВЗ.Р}}, \quad (2)$$

где $\ell_{ГЗ.Р}$ – расчетная общая длина горизонтальных заземлителей ($ГЗ$), м; $\ell_{ВЗ.Р}$ – расчетная общая длина вертикальных заземлителей ($ВЗ$), м; A – коэффициент пропорциональности, определяемый из условий:

$$A = 0,444 - 0,84 \cdot \frac{\ell_{В} + t_{ГЗ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} \quad (3)$$

$$\text{при } 0 \leq \frac{\ell_{В} + t_{ГЗ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} \leq 0,1;$$

$$A = 0,385 - 0,25 \cdot \frac{\ell_{В} + t_{ГЗ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} \quad (4)$$

$$\text{при } 0,1 \leq \frac{\ell_{В} + t_{ГЗ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} \leq 0,5,$$

где $\ell_{В}$ – расчетная длина одного ВЗ, м; $t_{ГЗ}$ – глубина расположения $ГЗ$, м.

Общая длина $ГЗ$ квадратной равномерной сетки ЗУ площадью $S_{ЗУ}, \text{ м}^2$, определяется по формуле, м:

$$\ell_{ГЗ.Р} = \frac{2 \cdot \sqrt{S_{ЗУ}} \cdot (\sqrt{S_{ЗУ}} + b_{ЗУ})}{b_{ЗУ}}, \quad (5)$$

где $b_{ЗУ}$ – размер ячейки равномерной сетки ЗУ, м.

Сравним формулы (1) и (2), предположив, что

вертикальные заземлители отсутствуют. Тогда формула (2) с учетом формулы (5) примет вид:

$$R_{ЗУ} = A \cdot \frac{\rho_{ЭКВ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} + \frac{\rho_{ЭКВ}}{\ell_{ГЗ.Р}} = A \cdot \frac{\rho_{ЭКВ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} + \frac{\rho_{ЭКВ} \cdot b_{ЗУ}}{2 \cdot \sqrt{S_{ЗУ}} \cdot (\sqrt{S_{ЗУ}} + b_{ЗУ})}, \quad (6)$$

где A – коэффициент при отсутствии вертикальных заземлителей, который определяется из условий:

$$A = 0,444 - 0,84 \cdot \frac{t_{ГЗ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} \quad \text{при } 0 \leq \frac{t_{ГЗ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} \leq 0,1; \quad (7)$$

$$A = 0,385 - 0,25 \cdot \frac{t_{ГЗ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} \quad \text{при } 0,1 \leq \frac{t_{ГЗ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} \leq 0,5. \quad (8)$$

В реальном диапазоне значений параметров $S_{ЗУ} (1-9) \cdot 10^4 \text{ м}^2$ и $t_{ГЗ} (0,4-1,4) \text{ м}$ подстанций 330 (220) кВ значение коэффициента A будет определяться условием (7), подставив которое в формулу (6), получим, Ом:

$$R_{ЗУ} = \left(0,444 - 0,84 \cdot \frac{t_{ГЗ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} \right) \cdot \frac{\rho_{ЭКВ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} + \frac{\rho_{ЭКВ} \cdot b_{ЗУ}}{2 \cdot \sqrt{S_{ЗУ}} \cdot (\sqrt{S_{ЗУ}} + b_{ЗУ})}. \quad (9)$$

Учитывая, что в диапазоне значений глубины $ГЗ$ 0,4–1,4 м значение $R_{ЗУ}$ изменяется не более, чем на 2 % [7], то в расчетах целесообразно принять наиболее широко используемое значение $t_{ГЗ}=0,7 \text{ м}$. Тогда формула (9) примет вид, Ом:

$$R_{ЗУ} = \left(0,444 - 0,84 \cdot \frac{0,7}{\sqrt{S_{ЗУ}}} \right) \cdot \frac{\rho_{ЭКВ}}{\sqrt{S_{ЗУ}}} + \frac{\rho_{ЭКВ} \cdot b_{ЗУ}}{2 \cdot \sqrt{S_{ЗУ}} \cdot (\sqrt{S_{ЗУ}} + b_{ЗУ})} = \frac{\rho_{ЭКВ}}{2 \cdot \sqrt{S_{ЗУ}}} \times \left(\frac{0,888 \cdot \sqrt{S_{ЗУ}} - 1,176}{\sqrt{S_{ЗУ}}} + \frac{b_{ЗУ}}{\sqrt{S_{ЗУ}} + b_{ЗУ}} \right) = \frac{\rho_{ЭКВ}}{2 \cdot \sqrt{S_{ЗУ}}} \cdot K_1, \quad (10)$$

где K_1 – коэффициент пропорциональности между нормативной формулой (1) и формулой Оллендорфа - Лорана без вертикальных заземлителей.

Оценим K_1 для подстанций 330 (220) кВ в реальном диапазоне значений $S_{ЗУ}$ и $b_{ЗУ} (5-25 \text{ м})$. Зависимость $R_{ЗУ} = f(S_{ЗУ})$ является убывающей, а зависимость $R_{ЗУ} = f(b_{ЗУ})$ – возрастающей [7]. В связи с этим K_1 будет максимальным при минимальной $S_{ЗУ}$ и максимальном $b_{ЗУ}$, а минимальным – при минимальном $b_{ЗУ}$ и максимальной $S_{ЗУ}$: $K_{1\text{max}} = 1,088$; $K_{1\text{min}} = 0,904$. Таким образом, значение $R_{ЗУ}$, рассчитанное по формуле Оллендорфа - Лорана при отсутствии вертикальных заземлителей, отличается от значения $R_{ЗУ}$, рассчитанного по нормативной формуле, не более чем на $\pm 10 \%$.

Формула Лорана. Сопротивление ЗУ квадратной равномерной сетки, расположенной в двухслойном грунте, можно определить по формуле Лорана [4], Ом:

$$R_{3y} = \frac{\rho_2}{2 \cdot D_{\text{ЭКВ}}} + \frac{\rho_1}{\ell_{\text{ГЗ.Р}}} = \frac{\sqrt{\pi} \cdot \rho_2}{4 \cdot \sqrt{S_{3y}}} + \frac{\rho_1 \cdot b_{3y}}{2 \cdot \sqrt{S_{3y}} \cdot (\sqrt{S_{3y}} + b_{3y})}, \quad (11)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельное сопротивление первого (верхнего) и второго слоев грунта соответственно, Ом×м; $D_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный диаметр круга, площадь которого, равна площади ЗУ, м.

Если ЗУ расположено в однородном грунте ($\rho_{\text{ЭКВ}} = \rho_1 = \rho_2$), то формула Лорана примет вид, Ом:

$$R_{3y} = \frac{\rho_2}{2 \cdot D_{\text{ЭКВ}}} + \frac{\rho_1}{\ell_{\text{ГЗ.Р}}} = \frac{\sqrt{\pi} \cdot \rho_{\text{ЭКВ}}}{4 \cdot \sqrt{S_{3y}}} + \frac{\rho_{\text{ЭКВ}} \cdot b_{3y}}{2 \cdot \sqrt{S_{3y}} \cdot (\sqrt{S_{3y}} + b_{3y})} = \frac{\rho_{\text{ЭКВ}}}{2 \cdot \sqrt{S_{3y}}} \cdot \frac{\sqrt{\pi} \cdot (\sqrt{S_{3y}} + b_{3y}) + 2 \cdot b_{3y}}{2 \cdot (\sqrt{S_{3y}} + b_{3y})} = \frac{\rho_{\text{ЭКВ}}}{2 \cdot \sqrt{S_{3y}}} \cdot K_2, \quad (12)$$

где K_2 – коэффициент пропорциональности между формулой (1) и формулой Лорана для однородного грунта.

Оценим K_2 для подстанций 330(220) кВ в реальном диапазоне значений S_{3y} та b_{3y} : $K_{2\text{max}} = 1,0862$; $K_{2\text{min}} = 0,9026$. Таким образом, значение R_{3y} , рассчитанное по формуле Лорана для однородного грунта (12), отличается от значения R_{3y} , рассчитанного по нормативной формуле, не более чем на $\pm 10\%$. Кроме того, следует заметить, что коэффициенты K_1 и K_2 практически равны между собой, т.е. значение R_{3y} , рассчитанное по формуле (14) будет практически равно значению R_{3y} , рассчитанному по формуле (10) в указанных условиях.

Недостатки формул. Рассмотренные выше формулы учитывают не все параметры, приведенные в табл. 1. Так, формула (1) учитывает лишь два параметра S_{3y} и $\rho_{\text{ЭКВ}}$. Формула (2) учитывает не только S_{3y} и $\rho_{\text{ЭКВ}}$, но длину горизонтальных ($\ell_{\text{ГЗ.Р}}$) и вертикальных ($\ell_{\text{ВЗ.Р}}$) заземлителей и глубину расположения ГЗ ($t_{\text{ГЗ}}$). Однако, при отсутствии ВЗ, формула (2) кроме S_{3y} и $\rho_{\text{ЭКВ}}$ учитывает размер ячейки сетки ЗУ (b_{3y}), связанный формулой (5) с длиной ГЗ. Глубина расположения ГЗ в однородном грунте практически не влияет на значение сопротивления ЗУ. Формула (11) учитывают не только S_{3y} и b_{3y} , но и параметры двухслойной структуры грунта. В условиях однородного грунта формула (11) дает такие же значения сопротивления ЗУ, как и формула (2). Однако, ЗУ практически всех подстанций 330(220) кВ расположены в грунтах с многослойной (три и более слоев) структурой, поэтому использование формулы (11) предпочтительнее формулы (2).

Постановка задачи исследования. В связи с вышесказанным, представляется актуальным разработка формулы расчета сопротивления ЗУ, которая

учитывала бы все факторы, приведенные в табл. 1. Для этого необходимо провести многофакторный эксперимент, используя методы теории планирования экспериментов [8–10].

Эксперименты проводятся с использованием прикладной программы Grounding 1.0, которая основана на известном методе [11] замены заземлителя множеством точечных источников тока и таким подбором тока, при котором эквипотенциальная поверхность результирующего электрического поля в грунте будет иметь такую же форму, что и поверхность заземлителя. В работе [12] с использованием этого метода разработана математическая модель ЗУ, в которой учитываются следующие особенности: двухслойная электрическая структура грунта; реальная конфигурация заземлителей; изменяемая по длине заземлителя плотность тока, стекающего в грунт; продольное сопротивление ферромагнитных заземлителей нелинейно зависит от амплитуды и частоты протекающего по ним тока.

На первом этапе проведено пять однофакторных экспериментов для определения характера зависимости сопротивления ЗУ от каждого из независимых факторов [7]. В работе показано, что зависимости $R_{3y} = f(S_{3y})$, $R_{3y} = f(\rho_{\text{ГЗ}})$, $R_{3y} = f(I_{\text{КЗ}})$ являются убывающими, а зависимости $R_{3y} = f(b_{3y})$ и $R_{3y} = f(\rho_{\text{ЭКВ}})$ – возрастающими. Зависимости $R_{3y} = f(S_{3y})$, $R_{3y} = f(I_{\text{КЗ}})$ носят нелинейный характер, поэтому аппроксимируются полиномами четвертого порядка. Зависимости $R_{3y} = f(b_{3y})$, $R_{3y} = f(\rho_{\text{ГЗ}})$, $R_{3y} = f(\rho_{\text{ЭКВ}})$, $R_{3y} = f(t_{\text{ГЗ}})$ носят линейный (или близкий к линейному) характер, поэтому аппроксимируются уравнением прямой. При этом область значений фактора S_{3y} целесообразно разделить на три участка, а область значений фактора $I_{\text{КЗ}}$ – на два.

Таким образом, необходимо провести четырехфакторный эксперимент для значений $I_{\text{КЗ}}$ в диапазоне 1–10 кА, а также пятифакторный эксперимент для значений $I_{\text{КЗ}}$ в диапазоне 10–40 кА. Каждый эксперимент будет состоять из трех ветвей, т.к. область значений фактора S_{3y} разделена на три участка.

Эксперимент ПФЭ-2⁵. Полный двухуровневый пятифакторный эксперимент (ПФЭ-2⁵) позволяет получить математическую модель вида [8–10]:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < \ell \leq k} b_{i\ell} x_i x_\ell + \sum_{1 \leq i < \ell < m \leq k} b_{i\ell m} x_i x_\ell x_m + \sum_{1 \leq i < \ell < m < p \leq k} b_{i\ell m p} x_i x_\ell x_m x_p + \sum_{1 \leq i < \ell < m < p < r \leq k} b_{i\ell m p r} x_i x_\ell x_m x_p x_r, \quad (13)$$

где $k = 5$ – количество факторов; \hat{y} – оценка отклика R_{3y} ; $x_0 = 1$ – фиктивный фактор; x_i – кодированные значения факторов; b_0 – свободный член; b_i – коэффициенты, учитывающие непосредственное влияние факторов на отклик; $b_{i\ell}$ – коэффициенты, учитывающие парные взаимодействия факторов; $b_{i\ell m}$ – коэффициенты, учитывающие тройные взаимодействия факторов; $b_{i\ell m p}$ – коэффициенты, учитывающие взаимо-

действия четырех факторов; $b_{i\ell mpr}$ – коэффициент, учитывающий взаимодействие пяти факторов.

Общее количество коэффициентов регрессии в данном эксперименте равно количеству опытов $N = 2^k = 2^5 = 32$.

Кодирование факторов выполняется по формуле:

$$x_i = (X_i - X_i^0) / h_i, \quad (14)$$

где X_i – текущее значение i -того фактора; X_i^0 – основной уровень i -того фактора; h_i – интервал варьирования i -того фактора.

В двухуровневых экспериментах каждый фактор принимает только два значения ($X_{iв}$ – верхнее и $X_{iн}$ – нижнее). В этом случае кодированные значения факторов (x_i) будут иметь два значения: -1 ; $+1$. Значения основного, нижнего и верхнего уровней, а также интервалы варьирования факторов для данного эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Условия ПФЭ-2⁵

Параметр фактора	Обозначение фактора					
	S_{3y} , га	b_{3y} , м	$p_{ГЗ}$, мм	$\rho_{ЭКВ}$, Ом×м	$I_{КЗ}$, кА	x_i
Ветвь 1 ($1 \leq S_{3y} \leq 3$ га, $1 \leq I_{КЗ} \leq 10$ кА)						
Нижний уровень $X_{iн}$	1	5	32	21	1	-1
Основной уровень X_i^0	2	15	92	136	5,5	0
Верхний уровень $X_{iв}$	3	25	152	251	10	+1
Интервал варьирования h_i	1	10	60	115	4,5	
Ветвь 2 ($3 \leq S_{3y} \leq 5$ га, $1 \leq I_{КЗ} \leq 10$ кА)						
Нижний уровень $X_{iн}$	3	5	32	21	1	-1
Основной уровень X_i^0	4	15	92	136	5,5	0
Верхний уровень $X_{iв}$	5	25	152	251	10	+1
Интервал варьирования h_i	1	10	60	115	4,5	
Ветвь 3 ($5 \leq S_{3y} \leq 9$ га, $1 \leq I_{КЗ} \leq 10$ кА)						
Нижний уровень $X_{iн}$	5	5	32	21	1	-1
Основной уровень X_i^0	7	15	92	136	5,5	0
Верхний уровень $X_{iв}$	9	25	152	251	10	+1
Интервал варьирования h_i	2	10	60	115	4,5	

Коэффициенты регрессии определяются по формулам [8–10]:

$$b_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N y_j; \quad (15)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j; \quad (16)$$

$$b_{i\ell} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{\ell j} y_j; \quad (17)$$

$$b_{i\ell m} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{\ell j} x_{mj} y_j; \quad (18)$$

$$b_{i\ell m p} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{\ell j} x_{mj} x_{pj} y_j; \quad (19)$$

$$b_{i\ell m p r} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{\ell j} x_{mj} x_{pj} x_{rj} y_j. \quad (20)$$

Для определения дисперсии воспроизводимости эксперимента необходимо провести шесть параллельных опытов в центре плана. При этом все факторы принимают значение, соответствующее основному уровню на протяжении всех параллельных опытов. Поскольку данный эксперимент является вычисли-

тельным, то, не изменяя никаких параметров математической модели ЗП в прикладной программе, не изменится и результат вычисления. Поэтому для определения дисперсии воспроизводимости эксперимента в математической модели ЗУ необходимо изменять тот параметр, который не является независимым фактором эксперимента. Таким параметром ЗУ может быть принята глубина расположения горизонтальных заземлителей ($t_{ГЗ}$). При проведении опытов в центре плана этот параметр принимал следующие значения 0,4 м; 0,6 м; 0,8 м; 1,0 м; 1,2 м; 1,4 м.

Дисперсия воспроизводимости эксперимента (s_y^2) с шестью опытами в центре плана определяется по формуле:

$$s_y^2 = \frac{1}{f_2} \cdot \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \cdot \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2, \quad (21)$$

где $n_0 = 6$ – количество параллельных опытов в центре плана; y_{0u} – значение отклика в u -том опыте в центре плана; $f_2 = n_0 - 1 = 6 - 1 = 5$ – число степеней свободы при определении дисперсии воспроизводимости эксперимента; \bar{y}_0 – среднее арифметическое значение отклика в центре плана:

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}. \quad (22)$$

Значимость коэффициентов регрессии определяется по критерию Стьюдента: коэффициент регрессии значим, если его абсолютная величина (b_i) больше доверительного интервала (Δb_i), который определяется по формуле:

$$\Delta b_i = \pm t_{\tau} \cdot s\{b_i\}, \quad (23)$$

где t_{τ} – табличное значение критерия Стьюдента при принятом уровне значимости (в технике чаще всего принимают уровень значимости равным 5 %) и числе степеней свободы (f_2) при определении дисперсии воспроизводимости эксперимента; $s\{b_i\}$ – ошибка в определении i -того коэффициента; $s^2\{b_i\}$ – дисперсия i -того коэффициента:

$$s\{b_i\} = \pm \sqrt{s^2\{b_i\}}; \quad (24)$$

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{N} \cdot s_y^2. \quad (25)$$

Табличное значение критерия Стьюдента [8] составляет $t_{\tau} = 2,571$ (для $f_2 = 5$).

Проверка адекватности полученной модели производится по критерию Фишера: если расчетное значение критерия Фишера (F_p) не больше табличного значения ($F_p \leq F_{\tau}$) для принятого уровня значимости (5 %) и соответствующего числа степеней свободы (f), то модель считается адекватной. В противном случае гипотеза адекватности отвергается. Расчетное значение критерия Фишера определяется по формуле:

$$F_p = s_{ад}^2 / s_y^2, \quad (26)$$

где $s_{ад}^2$ – дисперсия адекватности:

$$s_{ад}^2 = \frac{1}{f_1} \cdot \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2, \quad (27)$$

где y_j – значение отклика в j -ом опыте; \hat{y}_j – расчетное значение отклика, вычисленное с помощью полученной модели для условий j -ого опыта; N – количество опытов в матрице планирования; k – количество факторов; f_1 – число степеней свободы при определении дисперсии адекватности модели (17):

$$f_1 = N - (k + 1) = 32 - (5 + 1) = 26. \quad (28)$$

Табличное значение критерия Фишера [8] составляет $F_T = 4,5$ (для $f_1 = 26$ и $f_2 = 5$).

Эксперимент ПФЭ-2⁴. Эксперимент ПФЭ-2⁴ позволяет получить математическую модель вида:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < \ell \leq k} b_{i\ell} x_i x_\ell + \\ & + \sum_{1 \leq i < \ell < m \leq k} b_{i\ell m} x_i x_\ell x_m + \\ & + \sum_{1 \leq i < \ell < m < p \leq k} b_{i\ell mp} x_i x_\ell x_m x_p. \end{aligned} \quad (29)$$

Таблица 3 – Условия ПФЭ-2⁴

Параметр фактора	Обозначение фактора				
	S_{3y} , га	b_{3y} , м	$p_{ГЗ}$, мм	$p_{ЭКВ}$, Ом×м	x_i
Ветвь 1 ($1 \leq S_{3y} \leq 3$ га, $10 \leq I_{КЗ} \leq 40$ кА)					
Нижний уровень $X_{ин}$	1	5	32	21	-1
Основной уровень X_i^0	2	15	92	136	0
Верхний уровень $X_{ив}$	3	25	152	251	+1
Интервал варьирования h_i	1	10	60	115	
Ветвь 2 ($3 \leq S_{3y} \leq 5$ га, $10 \leq I_{КЗ} \leq 40$ кА)					
Нижний уровень $X_{ин}$	3	5	32	21	-1
Основной уровень X_i^0	4	15	92	136	0
Верхний уровень $X_{ив}$	5	25	152	251	+1
Интервал варьирования h_i	1	10	60	115	
Ветвь 3 ($5 \leq S_{3y} \leq 9$ га, $10 \leq I_{КЗ} \leq 40$ кА)					
Нижний уровень $X_{ин}$	5	5	32	21	-1
Основной уровень X_i^0	7	15	92	136	0
Верхний уровень $X_{ив}$	9	25	152	251	+1
Интервал варьирования h_i	2	10	60	115	

Кодированное значение факторов определяется по формуле (14). Общее количество коэффициентов регрессии в данном эксперименте равно количеству опытов $N = 2^k = 2^4 = 16$. Значения основного, нижнего и верхнего уровней, а также интервалы варьирования факторов для данного эксперимента приведены в табл. 3.

Коэффициенты регрессии определяются по формулам (15)–(19). Дисперсия воспроизводимости эксперимента (s_y^2) с шестью опытами в центре плана определяется по формуле (21). Число степеней свободы при определении дисперсии воспроизводимости эксперимента $f_2 = 5$. Значимость коэффициентов регрессии определяется по критерию Стьюдента. Доверительный интервал коэффициентов регрессии (Δb_i) определяется по формуле (23), в которой дисперсия коэффициентов регрессии $s^2\{b_i\}$ определяется по формуле (25). Табличное значение критерия Стьюдента составляет $t_T = 2,571$ (для $f_2 = 5$). Проверка адекватности модели производится по критерию Фишера. Расчетное значение критерия Фишера определяется по формуле (26), в которой дисперсия адекватности ($s_{ад}^2$) определяется по формуле (27). Для модели (33) число степеней свободы $f_1 = 11$. Табличное значение крите-

рия Фишера составляет $F_T = 4,75$ (для $f_1 = 11$ и $f_2 = 5$).

Анализ результатов. В табл. 4 и 5 приведено табличное представление уравнений регрессии для отклика $y = R_{3y}$, полученных в результате проведения экспериментов ПФЭ-2⁵ и ПФЭ-2⁴. Уравнению регрессии каждой ветви каждого эксперимента соответствует столбец коэффициентов регрессии и общий для всех экспериментов столбец кодированных значений факторов и их взаимодействий (столбец 1).

Таблица 4 – Уравнения регрессии ПФЭ-2⁵

Аргументы уравнения	Ветвь 1	Ветвь 2	Ветвь 3
	Условия применения уравнения		
	$1 \leq I_{КЗ} \leq 10$ кА		
	$1 \leq S_{3y} \leq 3$ га	$3 \leq S_{3y} \leq 5$ га	$5 \leq S_{3y} \leq 9$ га
	$5 \leq b_{3y} \leq 25$ м; $32 \leq p_{ГЗ} \leq 152$ мм; $21 \leq p_{ЭКВ} \leq 251$ Ом×м		
Коэффициенты полинома			
x_0	0,521773125	0,337085	0,26019875
x_1	-0,14322	-0,041468125	-0,035418125
x_2	0,033813125	0,0188775	0,01568875
x_3	-0,00788375	-0,00943	-0,0105925
x_4	0,429595625	0,2710775	0,20430125
x_5	-0,00281125	-0,00351	-0,004019375
$x_1 x_2$	-0,01296875	-0,001966875	-0,001221875
$x_1 x_4$	-0,12266125	-0,03585688	-0,03091938
$x_2 x_3$	-0,00308625	-0,00391	-0,00453125
$x_2 x_4$	0,023855625	0,0098725	0,00616125
$x_2 x_5$		-0,00168375	-0,00208938
$x_3 x_5$		0,00164625	0,002055625
$x_1 x_2 x_4$	-0,0118625	-0,00212063	-0,00159063
Количество значимых коэффициентов			
	11	13	13
Кодированное значение фактора			
x_1	$(S_{3y}-2)/1$	$(S_{3y}-4)/1$	$(S_{3y}-7)/2$
x_2	$(b_{3y}-15)/10$		
x_3	$(p_{ГЗ}-92)/60$		
x_4	$(p_{ЭКВ}-136)/115$		
x_5	$(I_{КЗ}-5,5)/4,5$		

Таблица 5 – Уравнения регрессии ПФЭ-2⁴

Аргументы уравнения	Ветвь 1	Ветвь 2	Ветвь 3
	Условия применения уравнения		
	$10 \leq I_{КЗ} \leq 40$ кА		
	$1 \leq S_{3y} \leq 3$ га	$3 \leq S_{3y} \leq 5$ га	$5 \leq S_{3y} \leq 9$ га
	$5 \leq b_{3y} \leq 25$ м; $32 \leq p_{ГЗ} \leq 152$ мм; $21 \leq p_{ЭКВ} \leq 251$ Ом×м		
Коэффициенты полинома			
x_0	0,518529375	0,332915625	0,25532375
x_1	-0,143830625	-0,041783125	-0,03580875
x_2	0,032635625	0,017133125	0,01347125
x_3	-0,006818125	-0,007749375	-0,00841875
x_4	0,429783125	0,271371875	0,20470125
$x_1 x_2$	-0,013329375	-0,002173125	-0,00148875
$x_1 x_4$	-0,122606875	-0,035804375	-0,03086625
$x_2 x_3$	-0,002936875	-0,003609375	-0,00396625
$x_2 x_4$	0,023951875	0,010029375	0,00637875
$x_1 x_2 x_4$	-0,011833125	-0,002089375	-0,00156125
Количество значимых коэффициентов			
	10	10	10
Кодированное значение фактора			
x_1	$(S_{3y}-2)/1$	$(S_{3y}-4)/1$	$(S_{3y}-7)/2$
x_2	$(b_{3y}-15)/10$		
x_3	$(p_{ГЗ}-92)/60$		
x_4	$(p_{ЭКВ}-136)/115$		

Анализ результатов расчета сопротивления ЗУ по указанным моделям для 80-ти подстанций 330(220) кВ показывает, что значение $R_{ЗУ}$, рассчитанное по уравнениям ПФЭ-2⁴ и ПФЭ-2⁵, практически всегда больше, чем значение $R_{ЗУ}$, рассчитанное по нормативной формуле (1).

Если размер ячейки сетки ЗУ равен 5 м, то для 36-ти из 80-ти подстанций относительная погрешность расчета $R_{ЗУ}$ менее 10 %, еще для 10-ти из 80-ти подстанций – менее 20 %, для 20-ти из 80-ти подстанций – более 20 %, но менее 50 %, для 9-ти из 80-ти подстанций – более 50 %, но менее 100 %, для 5-ти из 80-ти подстанций – более 100 %. При увеличении размера ячейки сетки относительная погрешность возрастает. Таким образом, значение $R_{ЗУ}$, рассчитанное по нормативной формуле (1), является оценкой "снизу", причем для 46-ти из 80-ти подстанций довольно грубой оценкой.

Выводы. В статье выполнен сравнительный анализ формул расчета сопротивления ЗУ: формула нормативного документа ГОСТ 12.1.30-81; формула Олендорфа-Лорана для равномерных квадратных сеток в однородном грунте; формула Лорана для равномерных квадратных сеток в двухслойном грунте. Показано, что некорректное эквивалентирование параметров многослойной структуры грунта к однослойной может привести к получению заниженного значения сопротивления ЗУ по формуле Олендорфа - Лорана. Для проверки корректности эквивалентирования целесообразно использовать формулу Лорана, предназначенную для двухслойного грунта.

В статье приведены результаты двухуровневых полных четырехфакторных и пятифакторных экспериментов, каждый из которых состоял из трех ветвей. Области значений факторов основаны на экспериментальных данных, полученных при проведении электромагнитной диагностики ЗУ подстанций 330(220)/150(110) кВ. Получены уравнения регрессии и условия их использования для определения сопротивления ЗУ. Показано, что сопротивление ЗУ, полученное по нормативной формуле, всегда меньше, чем полученное по уравнениям регрессии, даже при размере ячейки сетки ЗУ, равном 5 м.

Список литературы

1. Правила улаштування електроустановок. – К.: Мінерговугілля України, 2017. – 760 с.
2. Руденко С.С. Визначення напрямку реконструкції заземлювального пристрою / С.С. Руденко, Д.Г. Коліушко, О.В. Кащев // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – № 2. – С. 57-61.
3. ГОСТ 12.1.30-81 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление. – М.: Стандартинформ, 1981. – 10 с.
4. Волков В.П. Расчет и проектирование заземляющих устройств электроустановок высокого напряжения: Учеб. пособие / В.П. Волков, В.Е. Бондаренко. – К.: УМК ВО, 1990. – 116 с.
5. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках / П.А. Долин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 442 с.

6. Prasad D. Parameters Effecting Substation Grounding Grid Resistance / D. Prasad, H.C. Sharma // International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 4.1. – P. 1-5.

7. Забезпечення енергетичної безпеки України шляхом підвищення надійності роботи стратегічних енергооб'єктів в нормальному та аварійних режимах. Звіт про НДР (проміжний, держреєстрація № 0117U000534) / Керівник М.І. Баранов. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – 197 с.

8. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

9. Егоров А.Е. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента / А.Е. Егоров, Г.Н. Азаров, А.В. Коваль. Под ред. В. Г. Воронова. – Х.: Вища школа. 1986. – 240 с.

10. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

11. Бургсдорф В.В. Заземляющие устройства электроустановок / В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

12. Линк И.Ю. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте / И.Ю. Линк, Д.Г. Коліушко, Г.М. Коліушко // Электронное моделирование. – 2003. – Т. 25. № 2. – С. 99-111.

Bibliography (transliterated)

1. Pravila ulashtuvannja elektroustanovok [Rules for electrical installation]. Kyiv: Ministry of Energy and Coal of Ukraine, 2017. 760 p.
2. Rudenko S.S., Koliushko D.G., Kashchev O.V. Vznachennja naprjamku rekonstrukcii zazemljuval'nogo pristroju [Determination of the reconstruction direction of the grounding device]. Elektrotehnika i elektromehanika. 2017. № 2. p. 57-61.
3. GOST 12.1.30 81 Sistema standartov bezopasnosti truda. Jeletrobezopasnost'. Zashhitnoe zazemlenie. Zanutlenie [Occupational safety standards system. Electrical safety. Protection earthing. Neutraling]. Moscow: Standartinform, 1981. 10 p.
4. Volkov V.P., Bondarenko V.E. Raschet i proektirovanie zazemljajushhih ustrojstv jeletroustanovok vysokogo naprjazhenija: Ucheb. posobie [Calculation and design of grounding systems of high-voltage electrical installations: Tutorial]. Kyiv: UMK VO Publ., 1990. 116 p.
5. Dolin P.A. Osnovy tehniki bezopasnosti v jeletroustanovkah [Fundamentals of electrical installations safety]. Moscow: Jenergoatomizdat Publ., 1984. 442 p.
6. Prasad Dwarka, Sharma H.C. Parameters Effecting Substation Grounding Grid Resistance. International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences, 2015, vol. 4.1, p. 1-5.
7. Zabezpechennja energetichnoї bezpeki Ukraїni shljahom pidvishhennja nadijnosti roboti strategichnih energoob'ektiv v normal'nomu ta avarijnih rezhimah. Zvit pro NDR (promizhnij, derzhreestracija № 0117U000534) [Ensuring Ukraine's energy security by increasing the reliability of the operation of strategic energy facilities in normal and emergency modes. Report on research work (intermediate, state registration number 0117U000534)] / Head M. I. Baranov. Kharkiv: NTU «KhPI» Publ., 2017. 197 p.
8. Spiridonov A.A. Planirovanie jeksperimenta pri issledovanii tehnologicheskikh processov [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p.
9. Egorov A.E., Azarov G.N., Koval' A.V. Issledovanie us-

trojstv i sistem avtomatiki metodom planirovaniya jeksperimenta [Research of devices and automation systems by experiment planning] / Ed. V.G. Voronov. Kharkiv: Vishha shkola Publ. 1986. 240 p.

10. Adler Ju.P., Markova E.V., Granovskij Ju.V. Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 279 p.

11. Burgsdorf V.V., Jakobs A.I. Zazemljajushhie ustrojstva

jelektroustanovok [Electrical installation grounding systems]. Moscow: Jenergoatomizdat Publ., 1987. 400 p.

12. Link I.Ju., Koliushko D.G., Koliushko G.M. Matematicheskaja model' nejekvipotencial'nogo zazemljajushhego ustrojstva podstancii, razmeshhennogo v dvuh-slojnom rrunte [Mathematical model of non-equipotential grounding system of a substation located into a two-layer soil]. Jeletkronnoe modelirovanie. 2003. vol. 25. № 2. pp. 99-111.

Поступила (received) 15.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Глебов Олег Юрійович (Глебов Олег Юрьевич, Gļebov Oleg Jurijovych) – старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5_molnija@ukr.net.

УДК 621.319.4

В.И. ГУНЬКО, А.Я. ДМИТРИШИН, С.О. ТОПОРОВ

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С УЛУЧШЕННЫМИ МАССОГАБАРИТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Рассмотрены результаты исследований конденсаторных секций с различным рабочим диэлектриком для создания погружных высоковольтных импульсных конденсаторов с улучшенными массогабаритными характеристиками. Для каждого из типов диэлектрика было проведено ресурсные испытания на разных напряжениях, по результатам которых были сделаны выводы о наиболее перспективной конструкции рабочего диэлектрика секции для погружных конденсаторов. Также были выполнены расчеты тепловых режимов, по которым даны рекомендации по уменьшению перегрева в середине конденсатора.

Ключевые слова: рабочий диэлектрик секции конденсатора, длительная электрическая прочность, температура перегрева, погружной высоковольтный импульсный конденсатор.

В.І. ГУНЬКО, О.Я. ДМИТРИШИН, С.О. ТОПОРОВ

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБІНОВАНОГО ПЛІВКОВОГО ДІЕЛЕКТРИКА НА ОСНОВІ ПОЛІПРОПІЛЕНОВОЇ ТА ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТНОЇ ПЛІВОК

Розглянуто результати досліджень конденсаторних секцій з різним робочим діелектриком для створення занурювальних високовольтних імпульсних конденсаторів з покращеними масогабаритними характеристиками. Для кожного з типів діелектрика було проведено ресурсні випробування на різних напругах, за результатами яких були зроблені висновки о найбільш перспективній конструкції робочого діелектрика секції для занурювальних конденсаторів. Також були проведені розрахунки теплових режимів, за якими дані рекомендації щодо зменшення перегріву в середині конденсатора.

Ключові слова: робочий діелектрик секції конденсатора, довготривала електрична міцність, температура перегріву, занурювальний високовольтний імпульсний конденсатор.

V.I. GUN'KO, A.YA. DMITRISHIN, S.O. TOPOROV

ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE COMBINED FILM DIELECTRIC BASED ON POLYPROPYLENE AND POLYETHYLENE TEREPHTHALATE FILMS

The results of research of capacitor sections with different working dielectrics (paper, combined paper-film and pure film) for creation of downhole high-voltage pulse capacitors with the improved mass-size characteristics are considered. Residual tests for different types of dielectrics were carried out for different voltages, the results of which made conclusions about the most promising design of the section working dielectric for downhole capacitors (which one is combined paper-film dielectric). Also, calculations of thermal regimes were made, according to which the recommendations for reducing overheating inside the capacitor are given.

Keywords: working dielectric of the capacitor section, long-term dielectric strength, overheat temperature, downhole high-voltage pulse capacitor.